УДК 621.385

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МАГНЕТРОННЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ

И.И. Винтизенко

Научно-исследовательский институт ядерной физики Томского политехнического университета
E-mail: lablia@npi.tpu.ru

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований релятивистских магнетронных СВЧ генераторов. Показано влияние релятивистского эффекта и больших токов на выходные характеристики приборов, обоснован выбор параметров источников питания СВЧ генераторов, приведены результаты исследований приборов в импульсно-периодическом режиме.

Введение

Хорошо известно, что эффективность преобразования энергии электронов в энергию СВЧ колебаний в приборах со скрещенными полями выше по сравнению с приборами О-типа вследствие того, что в подобных устройствах электроны отдают свою потенциальную энергию. Скорость дрейфа электронов не изменяется, и постоянно сохраняются условия синхронизма с полем бегущей волны. Кроме того, в приборах О-типа выходная мощность ограничена величиной предельного тока. В этой связи очевидным представляется применение генераторов, преобразующих энергию электронов в энергию СВЧ колебаний непосредственно в промежутке катод-анод диода, работающего в режиме магнитной изоляции. Такие достоинства, как высокая эффективность, амплитудная и частотная стабильность, долговечность, небольшие весогабаритные показатели и стоимость, характерные для классических магнетронов и приборов на их основе, предопределили интерес к ним со стороны релятивистской высокочастотной электроники [1–3]. Отличия приборов показаны в табл. 1.

Принцип действия релятивистских магнетронных СВЧ генераторов (РМГ) идентичен классическим приборам. Однако определение области рабочих режимов и расчет выходных параметров требуют учета релятивистского фактора. Другое изменение области рабочих режимов РМГ вызвано большими рабочими токами. Сильноточный эффект в РМГ проявляется в наличии азимутального магнитного поля протекающего по катоду тока. Верхняя граница области рабочих режимов определяется величиной критического напряжения, выше которого нарушается магнитная изоляция магнетронного диода:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{\left(\frac{m_0c^2}{e}\right)^2 + H^2\left[\frac{R^2 - r_c^2}{2R}\right]^2 + H_\varphi^2} - \frac{m_0c^2}{e},$$

где m_0, e – масса и заряд электрона, c – скорость света, R, r_c – радиус анода и катода, H – напряженность продольного магнитного поля, $H_\varphi = \dfrac{\mu_0 I_z}{2\pi d_{\text{кат}}}$ – напряженность азимутального магнитного поля, создаваемого протекающим по катоду током I_Z, $d_{\text{кат}}$ – расстояние от катода. Нижняя граница области рабочих режимов определяется пороговым напряжением (ниже этого напряжения для данной величины магнитного поля невозможно синхронное движение электронов с замедленной электромагнитной волной анодного блока):

$$U_{\text{пор}} = H\beta_\Phi\left[\frac{R^2 - r_c^2}{2R}\right] - \frac{m_0c^2}{e}\left(1 - \sqrt{1 + H_\varphi^2}\sqrt{1 - \beta_\Phi^2}\right),$$

где $\beta_\Phi = V_\Phi/c$ – величина замедления волны, V_Φ – фазовая скорость волны.

На рис. 1 приведены зависимости критических и пороговых напряжений от величины продольного магнитного поля, рассчитанные при I_z=10 кА, когда отличия становятся заметными. Поскольку азимутальное магнитное поле препятствует радиальному движению электронов на анод, это приводит к росту рабочих напряжений релятивистского

магнетрона, увеличению азимутальной скорости движения электронов и, как следствие, к снижению КПД приборов в сравнении с нерелятивистским случаем.

Таблица 1. Сравнение классических и релятивистских магнетронных генераторов

Характеристика	Классический магнетрон	Релятивистский магнетрон
Тип катода	Термоэмиссионный	Взрывоэмиссионный
Напряжение, кВ	<50	100...1500
Ток, кА	<0,2	3...100
Длительность импульса напряжения, мкс	1...20 или непрерывный режим	0,03...1,5
Крутизна фронта импульса напряжения, кВ/мкс	<100	<10^5
Длительность импульса СВЧ излучения, мкс	Соответствует длительности импульса напряжения	0,02...1,2
Мощность, МВт	<5	100...10000
Длина волны излучения, см	0,8...60	3...30
КПД, %	50...82	<40

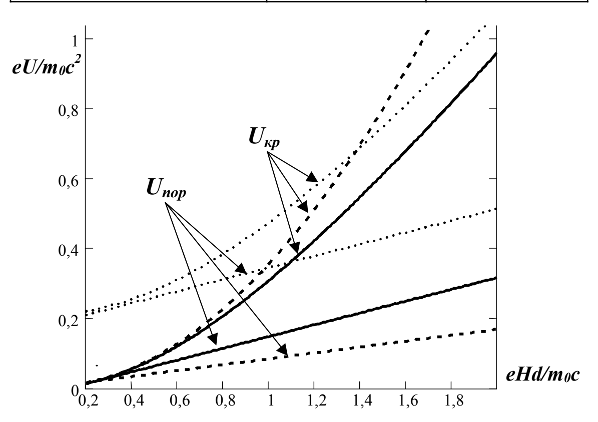


Рис. 1. *Диаграмма напряжений РМГ без учета (---) и с учетом (——) релятивистских эффектов и влиянием азимутального магнитного поля (• • •), d – межэлектродный промежуток*

Кроме того, как видно из рисунка, заметно сокращается область рабочих режимов, что накладывает определенные требования на стабильность электрического и магнитного полей.

Уравнения движения электронов в релятивистском магнетроне цилиндрической геометрии

Влияние релятивистского эффекта на снижение КПД магнетронных генераторов может быть подтверждено решением уравнений движения электронов для цилиндрической модели магнетрона:

$$\frac{d}{dt}(m\dot{r}) - mr\dot{\varphi}^2 = F_r, \qquad (1)$$

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dt}(mr^2\dot{\varphi}) = F_\varphi, \qquad (2)$$

где $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$, $F_r = e(\tilde{E}_r + E_r + r\dot{\varphi}(H + \tilde{H})/c)$, $F_\varphi = e(\tilde{E}_\varphi - \dot{r}(H + \tilde{H})/c)$, F_r, F_φ – компоненты сил, действующих на электрон со стороны статических электрического (E_r) и магнитного (H) полей, высокочастотных электрического ($\tilde{E}$) и магнитного ($\tilde{H}$) полей, $V = \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi})^2}$ – скорость электронов, $\dot{r}$, $r\dot{\varphi}$ – радиальная и азимутальная скорости.

Для аналитического решения ур. (1) и (2) предположим, что релятивистское движение электрона эквивалентно нерелятивистскому движению электрона с массой $m = m_0/\sqrt{1-V^2/c^2}$, причем, подкоренное выражение будем считать постоянной величиной, определяемой следующим образом: $\sqrt{1-V_\phi^2/c^2} \approx \sqrt{1-(r\dot{\varphi}/c)^2} \approx \sqrt{1-(E_r/H)^2}$. Фактически пренебрегаем радиальной скоростью электронов в сравнении с азимутальной. Действительно при отсутствии СВЧ полей движение электронов представляет собой медленный азимутальный дрейф и быстрое вращение с циклотронной частотой.

В СВЧ полях анодного блока электроны автоматически приобретают такую скорость вращения, что они всегда находятся в синхронизме с полем. Радиальная скорость электронов невелика, т. к. за период обращения электрон изменяет ее от нуля под серединой ламели анодного блока до максимальной в средней плоскости резонатора. Если электрон приобретает большую радиальную скорость, это сопровождается увеличением действующей на него силы Лоренца, заворачивающей электроны к катоду. Отметим также и то, что именно величина радиальной скорости электронов определяет потери энергии на аноде, т. е. КПД прибора. Стремление максимально уменьшить ее величину лежит в основе проектирования любого магнетронного генератора.

Используем предложенное упрощение для решения уравнений движения и учтем, что $\tilde{H} = \tilde{E}_r r V_\Phi / c$ (следует из выражения для потенциала высокочастотного поля), $rV_\Phi \approx r\dot{\varphi}$ (движение электронов происходит синхронно с высокочастотной волной) и $\dot{r} << c$. В этом случае ур. (1) и (2) преобразуются к виду:

$$\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = \frac{e}{m_0\gamma_\Phi}\left(E_r + \frac{1}{c}(r\dot{\varphi}\cdot H) - \frac{\tilde{E}_\varphi}{\gamma_\Phi^2}\right), \qquad (3)$$

$$r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} = -\frac{e}{m_0\gamma_\Phi}\left(\frac{1}{c}(\dot{r}\cdot H) + \frac{\tilde{E}_r}{\gamma_\Phi^2}\right), \qquad (4)$$

где $\gamma_\Phi = (1-\beta_\Phi)^{-1/2}$. Как видно из ур. (3) и (4) в релятивистском магнетроне по сравнению с нерелятивистским действие на электроны со стороны статических электрического и магнитного полей ослаблено в γ_Φ раз, а со стороны высокочастотных электрических полей ослаблено в γ_Φ^3 раз, что затрудняет процесс группировки электронов в спицы пространственного заряда. Поскольку магнетроны эффективно работают при больших замедлениях электромагнитной волны $\beta_\Phi \sim 0{,}2...0{,}45$, реляти-

вистские поправки составляют γ_Φ~1,02...1,09, γ_Φ^3~1,06...1,3. Дальнейшее решение ур. (3) и (4) и получение выражений для анодного тока и КПД прибора осуществляется методом, аналогичным для классических магнетронов [4]. Анализ решения показывает, что в релятивистском магнетроне по сравнению с нерелятивистским аналогом величина электронного КПД снижается примерно в γ_Φ раз, а величина анодного тока падает примерно в γ_Φ^3 раз. Таким образом, для получения высоких значений КПД и генерируемой мощности необходимо конструировать приборы с максимальным замедлением электромагнитной волны на рабочем виде колебаний, либо использовать источники питания с относительно низким выходным напряжением.

Высокое межэлектродное напряжение и большой анодный ток приводят к разрушению анодных блоков под действием теплового удара, значительным потерям торцевого тока, обусловленных азимутальным магнитным полем. Первая проблема решается выбором источников питания для РМГ с определенными значениями выходных параметров по напряжению, току и частоте следования импульсов или количеству импульсов в непрерывной серии [5]. Уменьшение потерь тока достигается применением труб дрейфа большого диаметра [6] и использованием катодов специальной геометрии [7].

Импульсно-периодические РМГ

Возможности практического применения РМГ вызывают интерес к разработке компактных источников электромагнитного излучения с высокой средней мощностью обладающих умеренными значениями импульсной мощности и работающих с большой частотой повторения импульсов. В этом случае возникает комплекс научно-технических задач, связанных с выбором источников питания РМГ, определением параметров электронных пучков, не приводящих к разрушениям анодных блоков, расчетом и конструированием элементов, допускающих работу прибора с высокой частотой повторения импульсов. Кроме того, накладываются дополнительные требования к катодному узлу РМГ, магнитной и вакуумной системам.

Для импульсно-периодических РМГ используются разработанные в НИИ ЯФ при ТПУ линейные индукционные ускорители (ЛИУ) на магнитных элементах [8]. Подобный ускоритель со схемой питания со стабилизацией напряжения первичного накопителя и рекуперацией энергии, позволяет формировать импульсы выходного напряжения с высокой воспроизводимостью амплитуды и формы (нестабильность менее 5 %) и высокой частотой повторения (до единиц кГц в пакетном режиме). В качестве замедляющей системы РМГ были выбраны 6- и 8-резонаторные анодные блоки секторного типа. Отличаясь простотой конструкции, замедляющая структура этого типа, тем не менее, удовлетворительно адаптируется к условиям работы с источником питания – ЛИУ. Характерной особенностью ЛИУ на магнитных элементах является, прежде всего, существенное отличие импедансов магнетрона и ускорителя в рабочем режиме (не менее чем в 2 раза), а также изменение амплитуды анодного напряжения в течение импульса. В этих условиях для стабильной работы магнетрона необходимо максимальное разделение рабочего вида колебаний от «паразитных» по частоте и фазовой скорости. Соответствующим выбором размеров анодного блока этого удается достигнуть [9]. Кроме того, очень важным условием для импульсно-периодических РМГ является возможность работы при невысоких значениях напряженности магнитного поля, чтобы можно было использовать электромагнитные системы на постоянном токе. Данное обстоятельство определяет относительно низкое выходное напряжение ЛИУ, снижая влияние релятивистских эффектов на работу прибора и увеличивая область рабочих напряжений.

Одним из наиболее жестких требований к импульсно-периодическому режиму работы РМГ является долговечность анодного блока и катода, как по общему числу импульсов, так и по числу импульсов в отдельной серии при высокой стабильности генерируемой частоты. Эти параметры магнетрона определяются разрушением поверхности анода и снижением эмиссионной способности материала катода. Поэтому были изготовлены водоохлаждаемые анодные блоки со скругленными ламелями для снижения напряженностей высокочастотного и статического электрических полей. Использовались графитовые катоды специальной геометрии для уменьшения потерь торцевого тока, обеспечивающие малое время возбуждения взрывной электронной эмиссии и работу при высоких температурах.

Магнитная система РМГ запитана от источника постоянного тока мощностью 40 кВт, выполнена из полой медной шинки с центральным отверстием для протекания охлаждающей воды. Использована система вакуумной откачки на основе паромасляных диффузионных насосов с дополнительными ветвями откачки пространства взаимодействия со стороны трубы дрейфа и волноводного вывода мощности. Схема управления СВЧ генераторами позволяет изменять выходное напряжение ЛИУ; частоту следования импульсов; непрерывный или пакетный режим работы; имеет различные блокировки, исключающие неправильную эксплуатацию.

Параметры импульсно-периодического РМГ с питанием от ЛИУ 04/6 приведены в табл. 2.

Стабильность работы релятивистского магнетрона демонстрирует серия из 200 импульсов тока (верхние осциллограммы, рис. 2) и сигналов СВЧ детектора при частоте следования 80 Гц. Нестабильность амплитуды тока, формируемого ЛИУ, составляет менее 5 % и нестабильность амплитуды СВЧ мощности не превышает 12 %.

Таблица 2. *Параметры 6-резонаторного импульсно-периодического РМГ 10 см диапазона длин волн и режимы работы*

Параметры РМГ	Режим работы	
Импульсная мощность 300 МВт Длительность СВЧ импульса 110 нс Напряжение 360 кВ Ток 3,6 кА	Частота следования импульсов, Гц	Число импульсов в серии
Длительность импульса тока 180 нс	0,4...8	не ограничено
Ширина полосы излучения <2 % Вес установки 3 т	12...80	10^5
Размеры 4×1×2 м^3	120...320	10^3

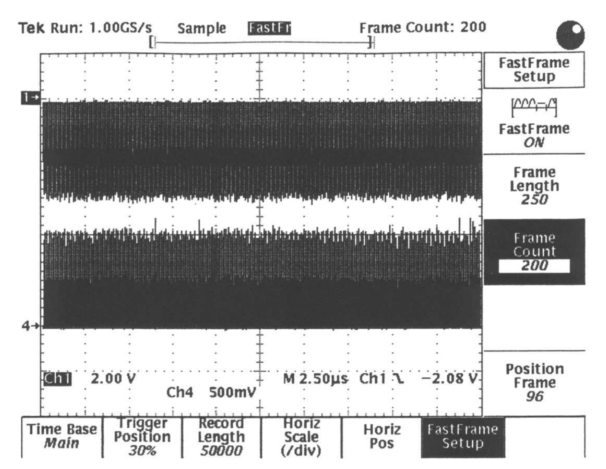


Рис. 2. *Серия из 200 импульсов с частотой следования 80 Гц. Верхние осциллограммы – полный ток ЛИУ, нижние – сигналы СВЧ детектора*

В настоящее время ведутся теоретические и экспериментальные работы по построению СВЧ источников с направленным управляемым излучением на основе оригинального магнетронного генератора, противоположные резонаторы которого связаны антенно-фидерным трактом. Тракт источника представляет собой систему рупорных излучателей, образующих линейную решетку. Использование разработанных принципов обеспечивает существенное повышение модовой и спектральной стабильности импульсного излучения и увеличение мощности СВЧ излучения до 400 МВт [10, 11], что позволяет применять РМГ с увеличенным числом резонаторов анодного блока повышенной эффективности.

Заключение

Решение уравнений движения электронов в релятивистском магнетроне цилиндрической геометрии показывает, что действие на электроны со стороны статических электрического и магнитного полей ослаблено в γ_Φ раз, а со стороны высокочастотного электрического поля – в γ_Φ^3 раз. Можно заключить, что в релятивистском магнетроне по сравнению с нерелятивистским аналогом величина электронного КПД снижается примерно в γ_Φ раз, а величина анодного тока падает примерно в γ_Φ^3 раз. В этой связи для получения высоких значений КПД и генерируемой мощности необходимо конструировать приборы с максимальным замедлением электромагнитной волны на рабочем виде колебаний.

Исследования релятивистских магнетронных генераторов показали, что и при повышенных напряжениях и токах (по сравнению с классическими аналогами) они являются высокоэффективными генераторами сантиметрового диапазона длин волн. Такие устройства имеют выходные параметры, близкие к предельным как по КПД (20...30 %), импульсной (300...400 МВт) и средней мощности (4 кВт), так и энергии в импульсе (15 Дж). Приборы адаптируются к условиям работы с различными типами линейных индукционных ускорителей в периодическом режиме работы с высокой частотой повторения импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 05-08-01210а и 06-08-08013-ОФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bekefi G., Orzechovski T. Giant microwave bursts emitted from a field emission relativistic electron beam magnetron // Phys. Rev. Let. – 1976. – V. 37. – № 6. – P. 379–382.
2. Ковалев Н.Ф., Кольчугин Б.Д., Нечаев В.Е. и др. Релятивистский магнетрон с дифракционным выводом мощности // Письма в ЖТФ. – 1977. – Т. 3. – № 20. – С. 1048–1051.
3. Диденко А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. и др. Исследование генерации мощных сверхвысокочастотных колебаний с помощью релятивистского магнетрона // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – № 3. – С. 10–13.
4. Нечаев В.Е. К анализу процессов в многорезонаторном магнетроне // Известия вузов. Радиофизика. – 1964. – Т. 7. – № 1. – С. 146–159.
5. Винтизенко И.И., Митюшкина В.Ю. Предельные режимы работы релятивистских магнетронных СВЧ генераторов // Радиотехника. – 2005. – № 10. – С. 74–79.
6. Сулакшин А.С. Ограничение утечки тока из пространства взаимодействия // Журнал технической физики. – 1983. – Т. 53. – № 11. – С. 2266–2268.
7. Свид. на ПМ 13937 РФ. МПК^7 H01J 25/00. Магнетрон / И.И. Винтизенко. Заявлено 07.12.1999; Опубл. 2000, Бюл. № 16. – 2 с. с ил.
8. Бутаков Л.Д., Васильев В.В., Винтизенко И.И., Фурман Э.Г. Линейные индукционные ускорители на магнитных элементах // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 5. – С. 104–110.
9. Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. и др. Импульсно-периодический релятивистский магнетрон // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 13. – С. 66–71.
10. Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Заревич А.И., Новиков С.С. Влияние внешней связи резонаторов релятивистского магнетрона на стабильность и мощность колебаний // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – № 7. – С. 64–70.
11. Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. Релятивистский магнетрон с распределенным выводом мощности // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – № 9. – С. 63–68.